

**Marián KRAJČOVIČ<sup>1</sup>, Miloslav ŘEZÁČ<sup>2</sup>**

## **KŘIVOLAKOST TRASY SILNIČNÍ KOMUNIKACE**

### **ÚVOD**

Doprava se jako celek skládá z velkého množství na sebe navazujících částečných jevů. Prioritní úlohu v ní však sehrává lidská činnost, ze které vyplývají technické prvky dopravy a dopravních zařízení a zároveň ovládá i pohyb dopravních prostředků v prostoru a čase.

Dopravní inženýrství se zabývá ději odehrávajícími se na komunikaci, pro jejichž popis využívá zákony fyziky, matematiky a matematické statistiky. Na základě těchto dějů se pak vytváří nebo upravují nové předpisy a normativy pro projektování silničních komunikací a dopravních zařízení.

Dosavadní předpisy a normy pro projektování silničních komunikací však většinou vycházejí z aplikací fyzikálních zákonů platících pro pohyb vozidla na komunikaci. Přitom v nich však nejsou zohledněna některá specifika současného vlivu více projekčních prvků trasy silniční komunikace na pohyb jednotlivého vozidla, či celého dopravního proudu. Na hodnotu rychlosti, kterou si řidič volí podle svých momentálních schopností a možností, má vliv i směrové a výškové vedení trasy [1] [5].

### **KŘIVOLAKOST SILNIČNÍ KOMUNIKACE**

Pohyb vozidla na pozemní komunikaci je současně ovlivňován jejím šířkovým, výškovým a směrovým vedením. Proto se silniční a dopravní inženýři snaží vyjádřit, lépe řečeno ohodnotit, trasu silniční komunikace z hlediska následnosti a vzájemné provázanosti v prostoru, kterou označujeme jako plynulost silniční trasy. Podle [2] [4] je silniční trasa plynulá, když její pravidelné tvary vzbudí u řidiče dojem, že tvar silniční trasy ničím neomezuje principy mechanické zákonitosti pohybu vyvozovaného řidičem na základě jeho dosavadních zkušeností bez toho, aby si to uvědomoval.

### **Definice křivolakosti**

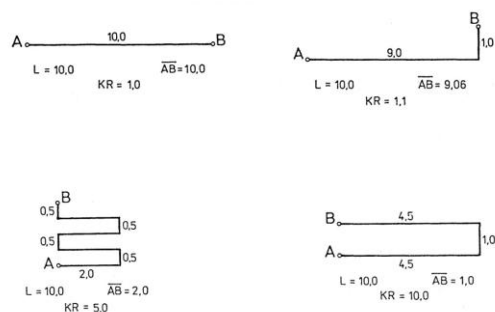
Aby bylo možné při porovnávání vícero variant řešení nějakým způsobem určit plynulost silniční trasy, je navrženo používat pojem křivolakost silniční trasy (*KŘ*). Tato je v literatuře [3] definována dvěma způsoby:

- a) poměrem skutečné a nejkratší vodorovné vzdálenosti bodů ležících na trase. Její využití je však velmi sporné, protože ne zcela přesně vystihuje složitost silniční trasy což je možné dokumentovat schémata na obr. 1 a 2.

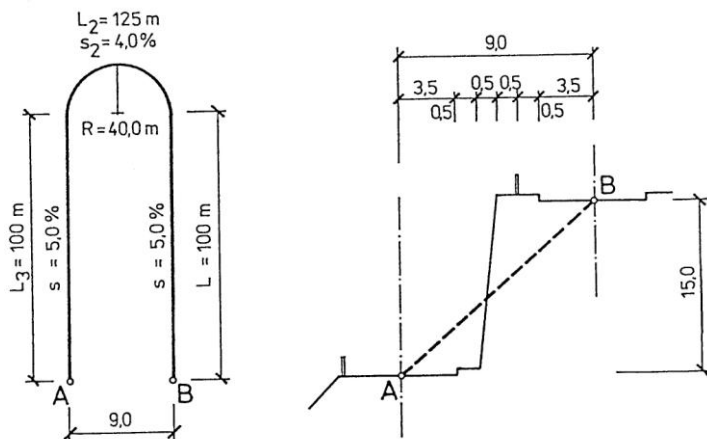
---

<sup>1</sup> Doc., Ing., CSc., Katedra dopravního stavitelství, Fakulta stavební VŠB – TUO

<sup>2</sup> Doc., Ing., Ph.D., Katedra dopravního stavitelství, Fakulta stavební VŠB – TUO



**Obr.1** Změna hodnoty  $K\check{R}$  stejně dlouhých tras v závislosti zvláště od jejich tvaru



**Obr.2** Změna hodnoty  $K\check{R}$  při uvažování prostorové vzdálenosti bodu A-B

- b) podílem sumy absolutních hodnot středových úhlů změn směru trasy připadajících na jednotku délky, který je možno napsat ve tvaru:

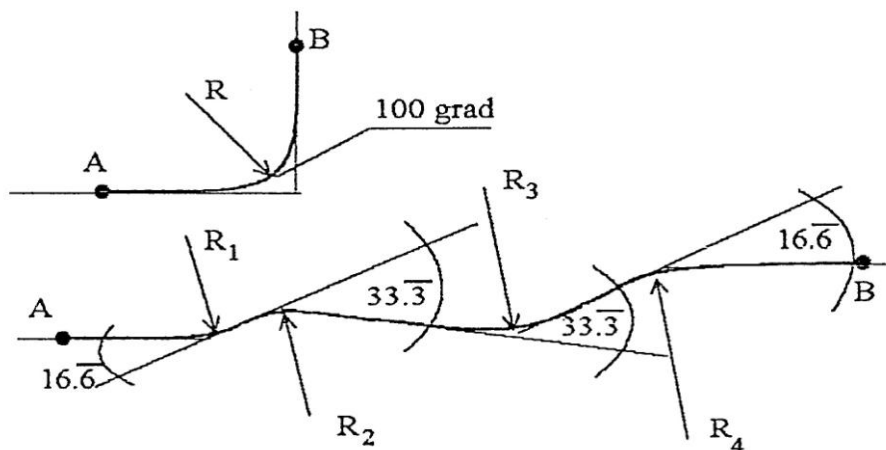
$$K\check{R} = \frac{\sum_{i=1}^j \alpha_i}{L} ; \quad [\text{grad/km}] \quad (1)$$

kde  $\alpha_i$  je středový úhel tečen směrového oblouku na dílčím úseku  $i$  v gradech,

$L$  celková délka trasy mezi body A-B v km.

Podle této definice a vztahu (1) křivolakost silniční trasy se vyjadřuje průměrnou hodnotou úhlu změny směru trasy připadající na jednotku délky, uvažované obvykle  $L = 1$  km.

Křivolakost vypočítaná podle vztahu (1) je jen průměrná hodnota a proto nezohledňuje místní odchylky od průměru a teda i skutečné směrové podmínky, které ovlivňují pohyb celého dopravního proudu. To znamená, že nemůžeme určit, zda jde o jeden směrový oblouk s malým poloměrem či o řadu po sobě jdoucích oblouků s velkými poloměry, jež v navržené trase působí plynuleji než oblouk s pravým úhlem viz obr. 3.



**Obr.3** Porovnání plynulosti tras se stejnou hodnotou křivolakosti

Z tohoto důvodu je nutné vypočítat hodnotu úsekové křivolakosti pro úseky silniční trasy konstantní délky „L“ ( $L = 50 \text{ m}, 100 \text{ m}, 200 \text{ m}$ ) a tuto vyjadřovat v rozměru (grad/km) podle vzorce:

$$K\ddot{R} = \frac{63,6620}{R_L} \quad [\text{grad/km}] \quad (2)$$

kde  $R_L$  je poloměr směrového oblouku v m na sledovaném úseku trasy.

V případě, že směrový oblouk není na celé délce úseku stanovíme hodnotu křivolakosti jako součet parciálních křivolakostí na úseku L.

### Vliv vedení silniční trasy na bezpečnost

Bezpečnost a pohodlnost jízdy závisí na množství informací, které řidič dostává ze samotné komunikace a z jejího okolí. Řidič při jízdě po komunikaci vidí směrový oblouk v perspektivě, tedy zkreslený a proto objektivní charakteristikou zaoblení může být jen viditelná křivost čar. Jednotkou měření, která není závislá ani na způsobu vyčíslování charakteristik čar ani na mechanismech hodnocení, je velikost poloměru křivosti.

Pro reálný oblouk v prostoru je tato veličina stálá, ale při zobrazení na sítnici očí proměnná. Vliv velikosti poloměru směrových oblouků na změnu psychofyziologických ukazatelů byl zjištěn při různých pokusech a výzkumech. Zde se potvrdila skutečnost, že řidič vnímá a hodnotí směrové zaoblení diskrétně. Diskrétnost hodnocení směrových oblouků potvrdil i výzkum na Stavební fakultě STU v Bratislavě [5], při kterém byl sledován koeficient příčné síly v závislosti na zrakovém hodnocení složitosti jízdy v obloucích.

### TRASA CESTY A JEJÍ VLIV NA RYCHLOST

Jelikož na pohyb vozidla v průběhu jízdy působí velké množství vnějších a vnitřních vlivů, které tento pohyb do určité míry determinují (např. technický stav vozidla, psychofyziologický stav řidiče, povětrnostní podmínky aj.) a dopravní inženýři, projektanti a ostatní pracovníci zapojení do stavby, provozu a údržby silnic nejsou tyto vlivy schopni ovlivnit, snaží se proto pochopit ty vlivy a podmínky, pomocí kterých jsou schopni někdy i ve značné míře ovlivnit pohyb jednotlivých vozidel a celého dopravního proudu po silniční komunikaci. První skupinu podmínek tvoří problémy spojené s vozovkou a jejími povrchovými vlastnostmi (rovnost, drsnost, atd.). Druhá skupina problémů je tvořena geometrickými prvky trasy pozemní komunikace (velikost poloměru směrového oblouku, šířka vozovky, velikost a délka směrového sklonu atd.), a jejich kombinací a následností v prostoru.

Vliv jednotlivých geometrických prvků trasy na velikost jízdní rychlosti vozidel se donedávna sledoval parciálně, tj. hledala se závislost mezi hodnoceným prvkem a jízdní rychlostí. Z těchto vztahů jsou u nás nejvíce propracované a do praxe zavedené vztahy mezi:

- ☐ rychlostí jízdy a velikostí poloměru směrového oblouku,
- ☐ jízdní rychlostí návrhového vozidla a velikostí či délkou podélného sklonu,
- ☐ rychlostí jízdy a šířkou zpevněné části vozovky.

#### Vztah mezi rychlostí jízdy a poloměrem směrového oblouku

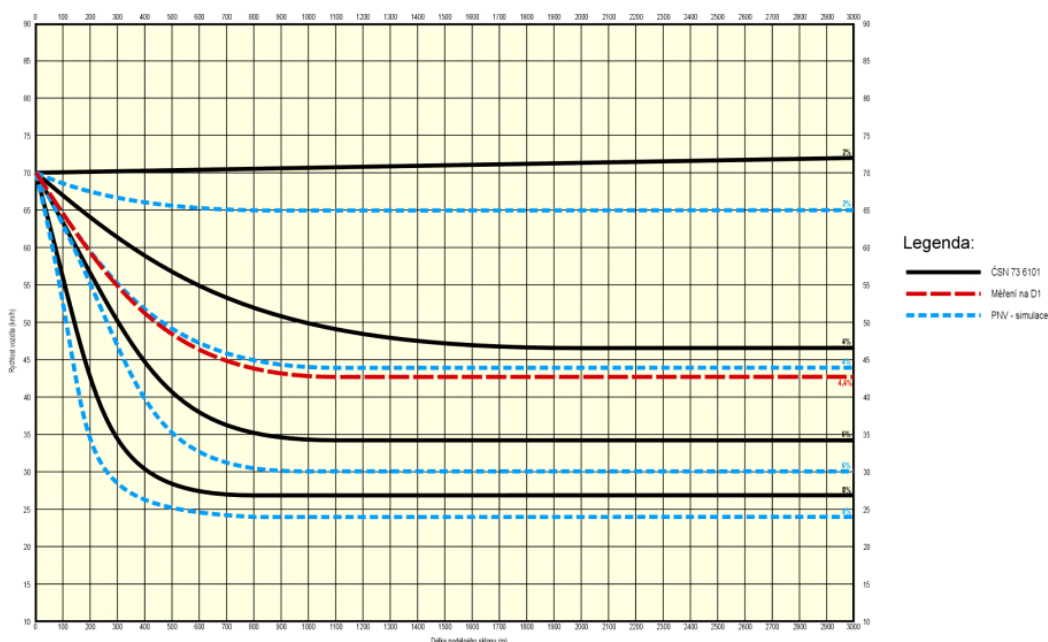
Jedním ze základních předpokladů relativně bezpečné trasy pozemní komunikace je návrh poloměru směrových oblouků tak, aby vyhovovaly předpokládané (návrhové) rychlosti. Problém vztahu mezi návrhovou rychlostí a poloměrem směrového oblouku je zahrnutý v [8] ve formě matematického výrazu na výpočet minimálního poloměru v závislosti od návrhové rychlosti ve tvaru :

$$R_{\min} = 0,30 \frac{V_n^2}{p} \quad [\text{m}], \text{ pro rychlost } < 80 \text{ km/h} \quad (3)$$

$$R_{\min} = 0,36 \frac{V_n^2}{p} \quad [\text{m}], \text{ pro rychlost } > 80 \text{ km/h} \quad (4)$$

#### Vztah mezi rychlostí a podélným sklonem trasy

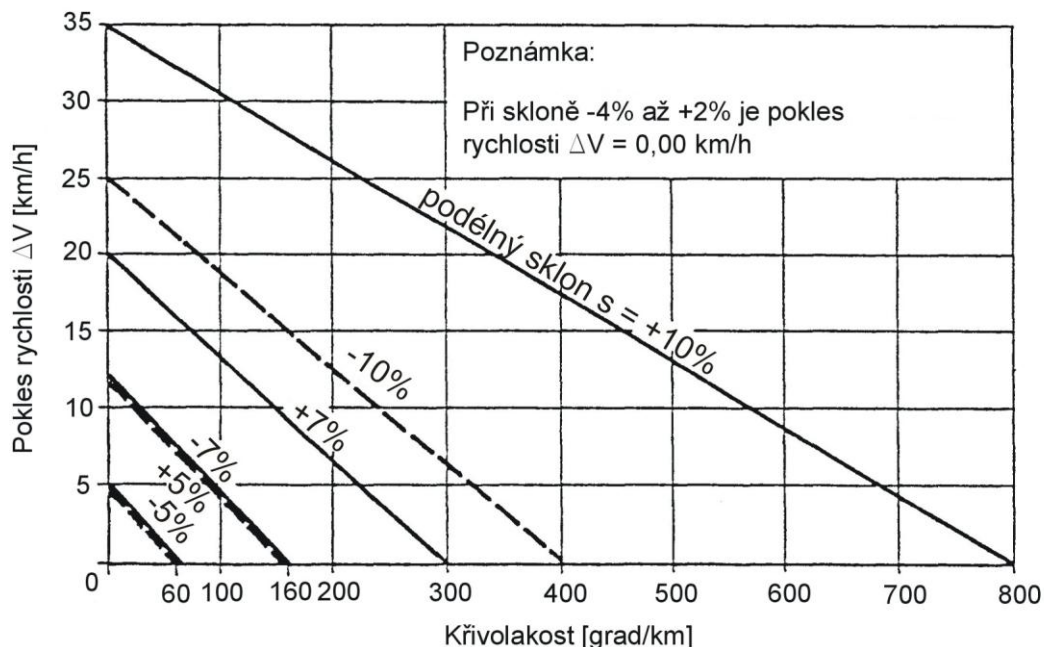
Vliv velikosti a délky podélného sklonu trasy komunikace (trasa je uvažovaná v půdoryse jako přímka) na rychlost návrhového pomalého (nákladního) vozidla je v [8] vyjádřená graficky, příloha K. Při měření [7] plovoucího vozidla CDV Brno, byly zjištěny vlivy různých typů pomalých vozidel na decelerační délky při různých podélných sklonech (viz Graf 1).



**Graf 1** Porovnání průběhů rychlosti pomalého návrhového vozidla ze současné ČSN 73 6101 a výsledků z měření CDV Brno

## Vliv podélného sklonu na změnu rychlosti

Závislost změny jízdní rychlosti na velikosti a délce podélného sklonu se u nás podrobně zkoumala a dala do užívání v grafické formě jen pro návrhové pomalé vozidlo [8]. Při výzkumu se však nepřihlédlo k vlivu směrového vedení silniční trasy a k velikosti této změny. Kombinace vlivu podélného sklonu a směrového vedení trasy (křivolakosti) na pokles hodnoty očekávané jízdní rychlosti [6] je vyjádřena graficky na obrázku 4.



**Obr.4** Pokles rychlosti v závislosti od křivolakosti a podélného sklonu silniční trasy

## Křivolakost silniční trasy a jízdní rychlost vozidel

Jak už bylo uvedeno na začátku, jízdní rychlost jednotlivě jedoucího vozidla na komunikaci, odpovídá rychlosti volené řidičem individuálně, na základě momentálně existujících směrových a výškových podmínek. Provozní podmínky jsou vynechány úmyslně, protože řidič při svém rozhodování není ovlivňován jinými vozidly.

V zahraniční literatuře [3] [4] je na výpočet očekávané rychlosti uvedený vztah zohledňující křivolakost silniční trasy, šířkové uspořádání vozovky a rozhledovou vzdálenost na zastavení ve tvaru:

□ lineárním:

$$V_{50\%} = 55,65 - 0,0532K\check{R}^2 + 50,414B \quad [\text{km/h}] \quad (5)$$

□ kvadratickém:

$$V_{50\%} = 61,03 - 0,0819K\check{R} + 0,0000496K\check{R}^2 + 4,85B \quad [\text{km/h}] \quad (6)$$

kde  $K\check{R}$  je křivolakost trasy, a  $B$  je součinitel šířkového a rozhledového uspořádání trasy.

U nás zatím nebyly odvozeny ani ověřovány vztahy výpočtu očekávané jízdní rychlosti, které by zohledňovaly uvedené parametry silniční trasy. Z dosud uvedeného vyplývá, že křivolakost silniční trasy má vliv na rychlost pohybu jednotlivě jedoucích vozidel. Ale akceptovat uvedené vztahy na výpočet jízdní rychlosti podle (5) nebo (6) není možné, protože výsledky z nich nejsou reálné pro všechny hodnoty  $K\check{R}$  a  $B$ .

Průměrné hodnoty rychlostí při průjezdu plovoucího vozidla směrovými oblouky s malými poloměry z nichž je odvozena odhadová funkce pro závislost jízdní rychlosti od křivolakosti silniční trasy tvaru:

$$V = 1540286 - 150297 \ln K\check{R} \quad [\text{km/h}] \quad (7)$$

jsou uvedeny v tabulce 1.

**Tab.1** Hodnoty rychlostí při průjezdech směrovými oblouky s malými poloměry

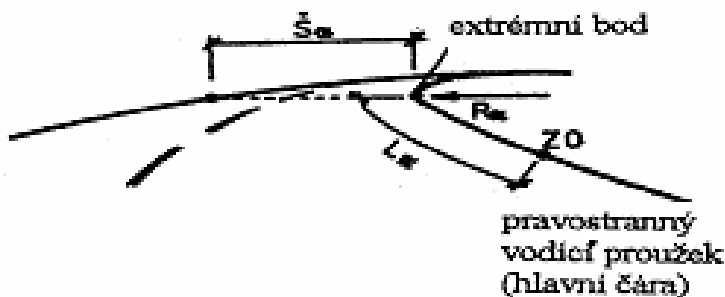
Poloměr [m]	12,60	21,30	34,60	37,10	51,40	88,40	102,60	111,60
$K\check{R}$ [grad/km]	5052,50	2988,80	1839,90	1716,00	1238,60	720,20	620,50	570,40
$V$ [km/h]	25,20	31,30	35,50	43,30	44,10	54,20	55,90	58,00

### VLIV TRASY NA PSYCHOFYZIOLOGICKÉ NAPĚTÍ ŘIDIČE

Ve zvýšení bezpečnosti silničního provozu je třeba vidět dvě stránky tohoto procesu, technickou stránku návrhu trasy a psychofyzilogický vliv trasy, jejího okolí a ostatních silničních prvků na řidiče. Psychologická kritéria bezpečnosti jízdy jsou závislá na pocitech, které u řidiče vyvolávají poměry na komunikaci a jejím bezprostředním okolí. Pocit bezpečí, klidu a jistoty při řízení vozidla jsou nerozlučně spojeny s jasností vedení komunikace a s jejím souladem s přilehlým pásem území. Bezpečnost a pohodlnost jízdy závisí na množství informací, které řidič dostává ze samotné komunikace a z jejího bezprostředního okolí. Tyto informace vnímá řidič zrakem, sluchem, svalovými reakcemi a vestibulárním systémem a snaží si vybrat takový režim jízdy, který mu dovoluje bez zvýšeného namáhání zohlednit všechny vnější činitele, které ovlivňují bezpečnost a pohodlí jeho jízdy. Hlavním zdrojem informací však zůstává zrak, kterým řidič vnímá nejpodstatnější informace.

### Poloměr křivosti trasy a optická plynulost

Řidič při jízdě po komunikaci vidí směrový oblouk v perspektivě, tedy zkreslený, a proto objektivní charakteristikou zaoblení může být jen viditelná křivost čar (viz obr. 5). Výsledky pokusů [4] [5] v pojízdných laboratořích (viz tab. 2) dále prokázaly, že na emocionální napjatost řidiče a na vnímání a hodnocení směrových oblouků má podstatný vliv intenzita dopravního proudu.



**Obr.5** Význam ukazatelů  $R_\alpha$  ;  $\check{S}_\alpha$  ;  $L_\alpha$  v perspektivním zobrazení

S optickou plynulostí čar je v první řadě spojený poloměr jejich křivosti v extrémním bodě  $R_\alpha$  (viz obr. 5). Důležitou úlohu při hodnocení bude mít jeho vztah k viditelné šířce jízdního pásu v extrémním bodě  $R_\alpha$ . Nejlepší charakteristikou plynulosti čar je závislost mezi délkou oblouku a poloměrem křivosti. Součin délky oblouku  $L_\alpha$  a poloměru křivosti v extrémním bodě  $R_\alpha$  je "parametr viditelného oblouku":

$$P_{vo} = L_{\alpha} \cdot R_{\alpha} \quad [\text{úhlové minuty}] \quad (8)$$

**Tab.2** Vliv křivosti trasy na změnu psychofyziologických ukazatelů

Psychofyziologické ukazatele	Poloměr směrového oblouku v m		
	400	500	700
	Rychlost jízdy v km/h		
	75	78	85
Rychlost pulsu v % k normálu	125	125	113
Změna hodnoty KGR (kožně-galvanický reflex)	0,45	0,42	0,30
Počet fixací za sekundu	2,6	2,5	1,9
Koeficient příčné síly v oblouku	0,110	0,109	0,080

Parametr viditelného oblouku je kvantitativním ukazatelem optické plynulosti a jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

**Tab.3** Hodnoty parametru optické plynulosti silnice

Charakteristika optické plynulosti silnice	Parametr viditelného oblouku při úrovni zabezpečení		
	50 %	85 %	90 %
plynulá	> 440	> 560	> 670
neplynulá	60 - 440	75 - 560	100 - 670
zlom	< 60	< 75	< 100

Oblast použití kvantitativního kritéria je omezená. Prahové hodnoty k jeho určení byly získané při výzkumech [5] [6] pro oblouky od  $R=100$  m do  $R=5000$  při vzdálenosti pozorovatele od začátku oblouku 50 m a při jeho vzdálenosti od hlavní čáry 1,5 m. Vztah mezi poloměrem křivosti  $R_{\alpha}$  a viditelnou šířkou jízdního pásu  $\check{S}_{\alpha}$  (viz obr. 5) je kvantitativním ukazatelem optické plynulosti směrových oblouků a jeho hodnoty jsou uvedené v tabulce 4.

**Tab.4** Viditelná šířka jízdního pásu v extrémním bodě

Viditelná šířka jízdního pásu v extrémním bodě $\check{S}_{\alpha}$	Poloměr křivosti $R_{\alpha}$ v extrémním bodě		
	zlom	neplynulé	plynulé
0 - 1	< 1,0	1,0 - 1,5	> 1,5
2	< 1,2	1,2 - 2,4	> 2,4
3	< 1,4	1,4 - 3,7	> 3,7
4	< 2,2	2,2 - 8,5	> 8,5
5	< 3,2	3,2 - 15,0	> 15,0

Poloměr křivosti v extrémním bodě  $R_{\alpha}$ , viditelná šířka jízdního pásu  $\check{S}_{\alpha}$  a parametr viditelného oblouku  $P_{vo}$  (8) jsou nejlepší kritéria při hodnocení optické plynulosti směrových oblouků. Porovnáním velikosti poloměrů oblouků s úrovněmi emocionálních napjatostí byly stanoveny hraniční velikosti poloměrů směrových oblouků. Jako kritický je stanovený takový poloměr, po jehož překročení se emocionální napjatost řidiče podstatně nezmění. Jako přípustný se považuje takový poloměr směrového oblouku, který vyvolá emocionální napětí odpovídající 95 % spolehlivosti činnosti řidiče a jako minimální odpovídající 85 % spolehlivosti. Jak ukázaly výsledky pokusů [4] [5] [6], tyto veličiny se mění v závislosti na hustotě dopravního proudu.

### Funkční úroveň pozemní komunikace

Při funkční úrovni silnice odpovídající hodnotám 0 - 0,3 je možný volný výběr režimu jízdy a na silnici se nevyskytují žádné překážky. Rychlost pohybu dopravního proudu v takovýchto podmínkách je určována dynamickými charakteristikami automobilu a povrchovými vlastnostmi vozovky. Při takovéto funkční úrovni emocionální napjatost začíná narůstat při jízdě v obloucích s poloměrem menším než 700 m a překračuje optimální úroveň při obloucích s poloměrem menším než 400 m.

Další snížení funkční úrovně silniční komunikace odpovídající hodnotám do 0,5 je charakterizováno výskytem ve skupinách za sebou jedoucích automobilů a se ztíženým předjížděním pomalejších automobilů. Kritická hodnota poloměru oblouku v takovýchto podmínkách je 600 m.

Při funkční úrovni silniční komunikace odpovídající poměru 0,5 - 0,7 byla zjištěna největší emocionální napjatost řidiče. Na základě získaných výsledků se dají stanovit přípustné poloměry směrových oblouků pro různé kategorie silničních komunikací v závislosti na očekávané úrovni dopravního zatížení. Emocionální napjatost řidiče při přiblížení se k směrovým obloukům nebo v jízdě po nich se mění jen v tom případě, když poloměry těchto oblouků se nacházejí v různých skupinách stupnice vnímání.

V tabulce 5 jsou uvedené oblouky s poloměrem větším než 200 m, které se mohou používat při navrhování směrových oblouků [5]. Plnou čarou je vyznačena hranice, od které vpravo jsou oblouky s poloměry, které jsou nedostatečné k zabezpečení optimální emocionální napjatosti řidiče. Mezi plnou a přerušovanou čarou se nacházejí intervaly oblouků, jejichž poloměry při odpovídajících úrovních dopravního zatížení můžeme považovat za kritické. Doporučené poloměry oblouků leží vlevo od přerušované čáry.

**Tab.5** Poloměry oblouků ve vztahu k funkční úrovni silnice

Funkční úroveň silnice	Číslo skupiny ve skupině							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Poloměry stejně vnímaných směrových oblouků m							
0,0 - 0,5	> 1200	800 - 1200	600 - 800	400 - 600	300 - 400	200 - 300		
0,5 - 0,7	> 2000	1000 - 2000	700 - 1000	500 - 700	400 - 500	300 - 400	250 - 300	200 - 250
0,7	> 1200	800 - 1200	400 - 800	200 - 400				

## ZÁVĚR

Neustálý růst intenzity silniční dopravy přináší s sebou zvyšování silniční nehodovosti, která nutí odborníky na celém světě ve větší míře prohlubovat analýzu příčin dopravních nehod a vyvozovat z nich závěry pro navrhování co nejbezpečnějších komunikací.

Bezpečnost, rychlost a pohodlnost jízdy spolu s ekonomickými ukazateli vhodného začlenění do krajiny a ochrany životního prostředí se stávají určujícími činiteli při návrhu trasy silniční komunikace. Ve zvýšení bezpečnosti silničního provozu je třeba vidět dvě stránky tohoto procesu: technickou stránku návrhu trasy a psychofyzilogický vliv trasy, jejího okolí a ostatních silničních prvků na řidiče.

Technickým problémem zvýšení bezpečnosti silničního provozu se věnuje velká pozornost a je nutno říci, že byly vyvinuty dokonalé metody stanovení jednotlivých návrhových prvků trasy, k určení prostředků zabezpečujících stabilitu jízdy vozidel a k návrhu všech ostatních opatření, která jsou nezávislá na zrakovém vnímání řidiče. Psychofyzilogická kritéria zvýšení bezpečnosti provozu nejsou ještě dokonale prozkoumána, i když jejich vliv na dopravní nehodovost je poměrně velký a statisticky na celém světě dokázaný. Určení těchto kritérií je složitý proces, do kterého kromě silničního stavitelství vstupují další vědní obory, jako je psychologie, fyziologie, medicína, nauka o informacích, matematika a inženýrská psychologie.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHOCHOL, Š. a kol.: Cesty a diaľnice 1. Projektovanie. ALFA Bratislava, 1989
- [2] A Philosophy for Landscape Design for Highways and Expressway. Public Works, Nr. 5, 1972
- [3] BORCHHARDT, D.: Bemerkungen zum Abschnitt räumliche Linienführung der Richtlinien für die Anlage von Landstrassen aus Beitragen zum Strassen und Verkehrswesen. Institut für Strassenverkehrstechnik der UTH, Stuttgart, 1968



- [4] LOBANOV, E.M.: Projektovanie dorog, organizacija dviženija s učetom psichofiziologii voditeľa. Transport Moskva, 1980
- [5] CHOCHOL, Š. a kol.: Vplyv prostredia na bezpečnosť cestnej premávky. Závěrečná správa čiastkovej VÚ II-8-1/06, SvF STU Bratislava, 1990
- [6] KRAJČOVIČ, M., MAREČEK, K., SOBOTKOVÁ, Š.: Vliv jízdy v koloně vozidel na psychofyzilogické napětí řidičů. Závěrečná zpráva vědecko-výzkumného úkolu č. 235 V-05-12 VA Brno, 1995
- [7] ANDRES, J. a kol.: Optimalizace návrhových prvků pozemních komunikací mimo zastavěné území. Zpráva výzkumného projektu MD ČR č.: 1F421/059/120, Centrum dopravního výzkumu Brno, 2005
- [8] ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic. ČNI Praha, 2004

**Reviewer:** Ing. J. Andres (Centrum dopravního výzkumu Brno)

